



Europäisches
Patentamt

European
Patent Office

Office européen
des brevets

REC'D 03 NOV 2003

WIPO

PCT

Bescheinigung

Certificate

Attestation

Die angehefteten Unterlagen stimmen mit der ursprünglich eingereichten Fassung der auf dem nächsten Blatt bezeichneten europäischen Patentanmeldung überein.

The attached documents are exact copies of the European patent application described on the following page, as originally filed.

Les documents fixés à cette attestation sont conformes à la version initialement déposée de la demande de brevet européen spécifiée à la page suivante.

Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°

02026147.5

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

Der Präsident des Europäischen Patentamts;
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office

Le Président de l'Office européen des brevets
p.o.

R C van Dijk



Anmeldung Nr:
Application no.: 02026147.5
Demande no:

Anmeldetag:
Date of filing: 25.11.02
Date de dépôt:

Anmelder/Applicant(s)/Demandeur(s):

C.S.E.M. CENTRE SUISSE D'ELECTRONIQUE ET DE
MICROTECHNIQUE SA
Rue Jaquet-Droz 1
2007 Neuchâtel
SUISSE

Bezeichnung der Erfindung/Title of the invention/Titre de l'invention:
(Falls die Bezeichnung der Erfindung nicht angegeben ist, siehe Beschreibung.
If no title is shown please refer to the description.
Si aucun titre n'est indiqué se référer à la description.)

Ressort spiral de montre et son procede de fabrication

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed /Priorité(s)
revendiquée(s)
Staat/Tag/Aktenzeichen/State/Date/File no./Pays/Date/Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation/International Patent Classification/
Classification internationale des brevets:

B21F/

Am Anmeldetag benannte Vertragstaaten/Contracting states designated at date of
filing/Etats contractants désignées lors du dépôt:

AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC NL PT SE SK TR

RESSORT SPIRAL DE MONTRE ET SON PROCEDE DE FABRICATION

La présente invention se rapporte à l'organe régulateur des pièces d'horlogerie, appelé balancier-spiral. Elle concerne, plus particulièrement, d'une part, un ressort spiral destiné à équiper le balancier d'une pièce d'horlogerie mécanique et, d'autre part, un procédé de fabrication de ce spiral.

L'organe régulateur des montres mécaniques est composé d'un volant d'inertie, appelé balancier et d'un ressort en spirale, appelé spiral ou ressort spiral, fixé par une extrémité sur l'axe du balancier et par l'autre extrémité sur un pont, appelé coq, dans lequel pivote l'axe du balancier.

Le balancier-spiral oscille autour de sa position d'équilibre (ou point mort). Lorsque le balancier quitte cette position, il arme le spiral. Cela crée un couple de rappel qui, lorsque le balancier est libéré, le fait revenir à sa position d'équilibre. Comme il a acquis une certaine vitesse, donc une énergie cinétique, il dépasse son point mort jusqu'à ce que le couple contraire du spiral l'arrête et l'oblige à tourner dans l'autre sens. Ainsi, le spiral régule la période d'oscillation du balancier.

Plus précisément, le ressort spiral équipant, à ce jour, les mouvements de montres mécaniques est une lame métallique élastique de section rectangulaire enroulée sur elle-même en spirale d'Archimède et comportant de 12 à 15 tours. On rappellera que le spiral est principalement caractérisé par son couple de rappel M, exprimé en première approximation par la formule:

$$M = E/L (w^3 \cdot t / 12 \cdot \phi)$$

avec :

- E : module d'Young de la lame [N/m²],
- t : épaisseur du spiral,
- w : largeur du spiral,

- L : longueur du spiral,
- φ : angle de torsion (rotation du pivot)

On comprendra aisément que la constante de rappel ou rigidité d'un spiral

$$C = M/\varphi,$$

- 5 qui caractérise le couple de rappel par unité d'angle de torsion, doit être le plus constant possible, quels que soient, notamment, la température et le champ magnétique. La matière utilisée a donc une importance primordiale.

10 Actuellement, on utilise des alliages complexes, tant par le nombre des composants (fer, carbone, nickel, chrome, tungstène, molybdène, béryllium, niobium...) que par les procédés métallurgiques utilisés. Le but recherché est d'obtenir une autocompensation des variations du module d'élasticité du métal en combinant deux influences contraires: celle de la température et celle de la magnétoconstriction (contraction des corps magnétiques sous l'effet de l'aimantation).

- 15 Les spiraux métalliques actuels sont difficiles à fabriquer. Tout d'abord, en raison de la complexité des procédés utilisés pour réaliser les alliages, les propriétés mécaniques intrinsèques du métal ne sont pas constantes d'une production à l'autre. Ensuite, le réglage, qui est la technique permettant de faire en sorte que la montre indique en tout temps l'heure la plus juste, est fastidieux et long. Cette
- 20 opération nécessite de nombreuses interventions manuelles et beaucoup de pièces défectueuses doivent être éliminées. Pour ces raisons, la production est coûteuse et le maintien d'une qualité constante est un défi permanent.

La présente invention a pour but de pallier ces inconvénients en proposant un spiral dont la sensibilité aux variations thermiques et aux champs magnétiques est minimisée. De plus, grâce à des techniques de fabrication assurant une

25 parfaite reproductibilité, la qualité des spiraux fournis ne fluctue pas.

De façon plus précise, l'invention concerne un ressort spiral destiné à équiper le balancier d'une pièce d'horlogerie mécanique et formé d'un barreau en spirale,

dont les spires ont une largeur w et une épaisseur t . Selon l'invention, ce spiral est réalisé à base de silicium et il est structuré et dimensionné de manière à minimiser la dérive thermique de l'ensemble.

5 De façon avantageuse, le barreau formant le ressort spiral est issu du découpage d'une plaque {001} de silicium monocristallin dont la structure et les dimensions permettent de minimiser la sensibilité à la température par le biais du premier (C_1) et du deuxième (C_2) coefficients thermiques de sa constante de rappel C .

10 Pour minimiser le premier coefficient thermique (C_1), le barreau comporte une âme en silicium et une couche externe d'épaisseur ξ formée autour de cette âme et constituée d'un matériau présentant un premier coefficient thermique du module d'Young E opposé à celui du silicium. De préférence, la couche externe est réalisée en oxyde de silicium (SiO_2) amorphe. Son épaisseur est environ 6% de la largeur w du barreau.

15 Pour minimiser le deuxième coefficient thermique (C_2), la largeur w du barreau est modulée de façon périodique en fonction de l'angle θ définissant l'orientation de chacun de ses points en coordonnées polaires. La modulation peut aussi, avantageusement, être réalisée de manière à ce que la rigidité locale à la flexion du barreau soit constante.

20 Afin d'optimiser le comportement thermique du ressort spiral, l'épaisseur t du barreau, sa largeur w , modulée dans le plan du spiral, et l'épaisseur de la couche d'oxyde de silicium ξ ont des valeurs pour lesquelles la dérive thermique de la constante de rappel C est minimale dans un domaine de température donné.

25 L'invention concerne également un procédé pour déterminer les dimensions optimales du ressort spiral qui vient d'être défini. Ce procédé consiste, successivement, à :

- exprimer mathématiquement la rigidité du spiral en fonction de son épaisseur t , de sa largeur w , modulée dans le plan du spiral, de l'épaisseur ξ de la couche d'oxyde de silicium, de l'anisotropie élastique du silicium et de la température;
- 5 – calculer le comportement thermique, en particulier les deux premiers coefficients thermiques de la constante de rappel du ressort spiral (C_1 et C_2), pour toutes les combinaisons de valeurs possibles des paramètres t , w , ξ dans un domaine de température donné; et
- 10 – retenir les combinaisons t , w , ξ pour lesquelles les dérivées thermiques de ces coefficients sont minimales.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, faite en regard du dessin annexé sur lequel :

- la figure 1 représente un ressort spiral selon l'invention ;
- la figure 2 montre un segment de ce spiral, en coupe longitudinale en a et en coupe transversale en b, de manière à illustrer les références des paramètres utiles à la description ; et
- 15 – la figure 3 illustre l'anisotropie du module d'Young dans le plan {001} du silicium.

20 Le spiral selon l'invention, représenté en 10 sur les figures 1 et 2, est un barreau découpé en spirale issu de l'usinage, par exemple par plasma, d'une plaque {001} de silicium monocristallin. Ce matériau est amagnétique et conformable à volonté, et permet des coûts de fabrication faibles.

25 Malheureusement, on remarque qu'il est difficile d'obtenir un ressort spiral en silicium à constante de rappel C constante car le module d'Young E de ce barreau est fortement influencé par la température. Il est donc indispensable de compenser cet effet.

Lorsqu'on modélise la sensibilité à la température d'une structure élastique, il est d'usage de faire intervenir les coefficients thermiques de sa constante de rappel C , tels qu'ils apparaissent dans une série mathématique du type :

$$C = C_0 (1 + C_1 \Delta T + C_2 \Delta T^2 \dots),$$

- 5 dans laquelle C_0 est la valeur nominale de la constante de rappel C et C_1 et C_2 sont, respectivement, ses premier et deuxième coefficients thermiques. Seuls les deux premiers coefficients sont pris en compte ici, les suivants étant négligeables.

- 10 On comprendra donc que, pour obtenir une constante de rappel C peu sensible à la température, on cherche à minimiser les coefficients thermiques C_1 et de C_2 .

Il faut rappeler que le silicium monocristallin présente une anisotropie cristalline. Dans le plan $\{001\}$, la direction $\langle 110 \rangle$ est plus rigide que la direction $\langle 100 \rangle$, ce qui, bien sûr, influence la rigidité en flexion du spiral 10.

- 15 Le module d'Young $E^{(a)}$ du plan $\{001\}$ du silicium peut s'exprimer, à l'instar de la constante de rappel, par une série mathématique du type :

$$E^{(a)} = E_0^{(a)} (1 + E_1^{(a)} \Delta T + E_2^{(a)} \Delta T^2),$$

- 20 dans laquelle $E_0^{(a)}$ est la valeur nominale du module d'Young $E^{(a)}$ et $E_1^{(a)}$ et $E_2^{(a)}$ sont, respectivement, ses premier et deuxième coefficients thermiques. Ces trois coefficients sont particulièrement représentés sur la figure 3 en fonction de l'orientation par rapport aux axes cristallographiques.

- 25 Le premier coefficient thermique $E_1^{(a)}$ du module d'Young est fortement négatif (-60 ppm/°C environ) et la valeur nominale du module d'Young $E_0^{(a)}$ est de 148 GPa dans la direction $\langle 100 \rangle$ du plan $\{001\}$. La dérive thermique d'un ressort spiral en silicium est ainsi d'environ 155 secondes/jour dans le domaine horloger $23^\circ \pm 15^\circ \text{C}$. Cela le rend incompatible avec les exigences horlogères qui sont de l'ordre de 8 secondes/jour.

Pour compenser cette dérive, le spiral 10 selon l'invention est constitué d'une âme en silicium 12 et d'une couche extérieure 14 en SiO₂, dont le premier coefficient thermique $E_1^{(b)}$ est fortement positif. Il est d'environ +215 ppm/°C et la valeur nominale de la rigidité $E_0^{(b)}$ est d'environ 72.4 Gpa.

- 5 Cette structure trilame symétrique, obtenue par oxydation thermique selon tout procédé connu, permet ainsi d'agir sur la stabilité thermique de la rigidité globale du spiral en flexion planaire.

10 On peut montrer que, pour un spiral découpé dans le plan {001}, il y a une minimisation optimale du premier coefficient thermique C_1 de la constante de rappel du spiral lorsque l'épaisseur de la couche d'oxyde 14 représente environ 6% de la largeur du ressort spiral.

15 Selon l'invention, le deuxième coefficient thermique C_2 peut être minimisé par la modulation de la largeur w du spiral, qui est la dimension située dans son plan d'enroulement, en fonction de l'angle θ qui caractérise l'orientation de chacun de ses points en coordonnées polaires.

20 Comme le montre la figure 1, la modulation peut être réalisée en rendant le spiral plus mince dans la direction rigide $\langle 110 \rangle$ et plus épais dans la direction moins rigide $\langle 100 \rangle$. Il est ainsi possible de compenser l'anisotropie du silicium et d'obtenir une rigidité locale à la flexion constante. Le spiral est alors dit équilibré élastiquement.

Dans ce cas particulier, si on appelle w_0 une largeur de référence du spiral dans le plan {001}, la largeur w varie en fonction de l'angle θ selon la relation :

$$w = w_0 \sqrt[3]{1 - \frac{1 - \frac{\bar{s}_{12,0}}{\bar{s}_{11,0}} - \frac{1}{2} \frac{\bar{s}_{44,0}}{\bar{s}_{11,0}}}{2} \sin^2(2\theta)}, \quad [m]$$

25 dans laquelle \bar{s}_{11} \bar{s}_{44} \bar{s}_{12} sont les trois coefficients élastiques indépendants du silicium dans les axes cristallographiques, connus de l'homme de métier, tels que

définis dans la publication de C. Bourgeois et Al. « Design of resonators for the Determination of the Temperature Coefficients of Elastic Constants of Monocrystalline Silicon » (Proc. 51th Annual Frequency Control Symposium, 1997, 791-799).

- 5 Plus concrètement, on comprend aisément que plusieurs paramètres interviennent de façon interdépendante et que, par exemple, l'amélioration du comportement thermique obtenue avec une certaine modulation de la largeur w ne sera pas identique pour toutes les épaisseurs d'oxyde et pour toutes les orientations cristallines du spiral.
- 10 Pour faciliter la détermination des valeurs optimales des différents paramètres, le procédé selon l'invention consiste à examiner, par exemple, la variabilité des coefficients thermiques de la constante de rappel C d'un spiral tel que décrit ci-dessus, en fonction de ces paramètres.

15 Les paramètres impliqués dans la détermination de C sont le module d'Young $E^{(a)}$ du silicium, le module d'Young $E^{(b)}$ de l'oxyde de silicium et les grandeurs géométriques illustrées sur la figure 2 :

- t = épaisseur du spiral (constante) [m]
- w = largeur du spiral dans le plan {001} [m]
- ξ = épaisseur de l'oxyde (constante) [m]

- 20 D'après la théorie des multilames, le module d'Young E équivalent en flexion d'un barreau de silicium recouvert d'une couche d'oxyde de silicium peut être modélisé dans une section locale selon la relation suivante :

$$E = (E^{(a)} - E^{(b)}) \left(1 - \frac{2\xi}{w}\right)^3 \left(1 - \frac{2\xi}{t}\right) + E^{(b)}$$

Comme, dans le cas du spiral 10, $\frac{\xi}{w} \ll 1$ et $\frac{\xi}{t} \ll 1$, l'équation devient :

25
$$E = E^{(a)} - (E^{(a)} - E^{(b)}) \left(\frac{6\xi}{w} + \frac{2\xi}{t} \right)$$

La constante de rappel C du ressort spiral et ses deux premiers coefficients thermiques C_1 et C_2 sont déterminés par intégration, sur toute sa longueur, de l'expression de la rigidité locale, elle-même fonction des expressions de E , t , w et ξ .

- 5 On peut montrer alors que le premier coefficient thermique C_1 est essentiellement fonction de ξ , tandis que le deuxième coefficient thermique C_2 dépend surtout de w .

- 10 Ensuite, il ne reste plus qu'à calculer, au moyen d'un ordinateur, les valeurs des coefficients thermiques C_1 et C_2 pour toutes les combinaisons de valeurs possibles des paramètres t , w , ξ . Les triplets t , w , ξ pour lesquels la dérive thermique de la constante de rappel C du ressort spiral est minimum dans un intervalle de température donné, sont extraits de l'ensemble des combinaisons possibles.

- 15 On peut alors choisir le triplet correspondant au spiral dont la constante de rappel C , déterminée à l'aide de la formule déjà donnée, est la mieux adaptée à l'application horlogère souhaitée.

Le spiral peut enfin être réalisé selon les indications fournies par le calcul.

- 20 Ainsi est proposé un spiral en silicium dont la sensibilité à la température est réduite au minimum. Il est prêt à être utilisé et ne nécessite aucun réglage, ni opération manuelle particulière.

La description qui précède n'est qu'un exemple particulier et non restrictif d'un spiral à base de silicium selon l'invention. Ainsi, la seule compensation thermique fournie par la couche d'oxyde est déjà satisfaisante en vue d'une utilisation dans des montres de gamme moyenne et la modulation de la largeur w est facultative.

REVENDEICATIONS

1. Ressort spiral destiné à équiper le balancier d'une pièce d'horlogerie mécanique et formé d'un barreau (10) en spirale, dont les spires ont une
5 largeur w et une épaisseur t , caractérisé en ce qu'il est réalisé à base de silicium et structuré et dimensionné de manière à minimiser la dérive thermique de l'ensemble.
2. Ressort spiral selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit barreau est issu du découpage d'une plaque {001} de silicium monocristallin.
- 10 3. Ressort spiral selon l'une des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que ledit barreau de silicium est structuré et dimensionné de manière à minimiser les premier (C_1) et deuxième (C_2) coefficients thermiques de sa constante de rappel C .
- 15 4. Ressort spiral selon la revendication 3, caractérisé en ce que, pour minimiser le premier coefficient thermique (C_1), ledit barreau comporte une âme (12) en silicium et une couche externe (14) d'épaisseur ξ formée autour de l'âme en silicium et constituée d'un matériau présentant un premier coefficient thermique du module d'Young opposé à celui du silicium.
- 20 5. Ressort spiral selon la revendication 4, caractérisé en ce que ladite couche externe (14) est réalisée en oxyde de silicium (SiO_2) amorphe.
6. Ressort spiral selon la revendication 5, caractérisé en ce que l'épaisseur ξ de ladite couche externe (14) représente environ 6% de la largeur w du barreau.
- 25 7. Ressort spiral selon la revendication 3, caractérisé en ce que, pour minimiser le deuxième coefficient thermique (C_2), la largeur dudit barreau est modulée, de façon périodique, en fonction de l'angle θ définissant l'orientation de chacun de ses points en coordonnées polaires.

8. Ressort spiral selon la revendication 3, caractérisé en ce que, pour minimiser le deuxième coefficient thermique (C_2), la largeur dudit barreau est modulée de manière à ce que sa rigidité locale à la flexion soit constante.

5 9. Ressort spiral selon la revendication 8, caractérisé en ce que la modulation est effectuée selon la formule :

$$w = w_0 \sqrt[3]{1 - \frac{1 - \frac{\bar{s}_{12.0}}{\bar{s}_{11.0}} - \frac{1}{2} \frac{\bar{s}_{44.0}}{\bar{s}_{11.0}}}{2} \sin^2(2\theta)}$$

dans laquelle \bar{s}_{11} \bar{s}_{44} \bar{s}_{12} sont les trois coefficients élastiques indépendants du silicium dans les axes cristallographiques.

10 10. Ressort spiral selon les revendications 4 et 7, caractérisé en ce que, pour minimiser les premier (C_1) et deuxième (C_2) coefficients thermiques, l'épaisseur t du barreau, sa largeur w dans le plan $\{100\}$ et l'épaisseur ξ de la couche d'oxyde de silicium ont des valeurs pour lesquelles la dérive thermique de la constante de rappel C du ressort spiral est minimum dans un intervalle de température donné.

15 11. Procédé pour déterminer les dimensions optimales du ressort spiral selon la revendication 10, caractérisé en ce qu'il consiste, successivement, à :

- exprimer mathématiquement la rigidité du spiral en fonction de son épaisseur t , de sa largeur w modulée dans le plan du spiral, de l'épaisseur ξ de la couche d'oxyde de silicium, de l'anisotropie élastique du silicium et de la température;
- 20 – calculer le comportement thermique, en particulier les deux premiers coefficients (C_1 , C_2) de la constante de rappel du ressort spiral pour toutes les combinaisons de valeurs possibles des paramètres t , w , ξ , dans un domaine de température donné; et

- retenir les combinaisons t, w, ξ pour lesquelles les dérivées thermiques desdits coefficients (C_1 et C_2) sont minimales.

12. Procédé selon la revendication 11, caractérisé en ce qu'il consiste, finalement, à calculer la largeur w du spiral en tout point par la formule :

5

$$w = w_0 \sqrt[3]{1 - \frac{1 - \frac{\bar{s}_{12,0}}{\bar{s}_{11,0}} - \frac{1}{2} \frac{\bar{s}_{44,0}}{\bar{s}_{11,0}} \sin^2(2\theta)}{2}}$$

dans laquelle \bar{s}_{11} \bar{s}_{44} \bar{s}_{12} sont les trois coefficients élastiques indépendants du silicium dans les axes cristallographiques.

ABREGE

5 L'invention concerne principalement un ressort spiral destiné à équiper le balancier d'une pièce d'horlogerie mécanique. Il est formé d'un barreau (10) en spirale issu du découpage d'une plaque {001} de silicium monocristallin. Sa structure et ses dimensions sont calculées de manière à minimiser la dérive thermique de l'ensemble balancier-spiral par le biais des premier et deuxième coefficients thermiques de sa constante de rappel.

10 Figure 1

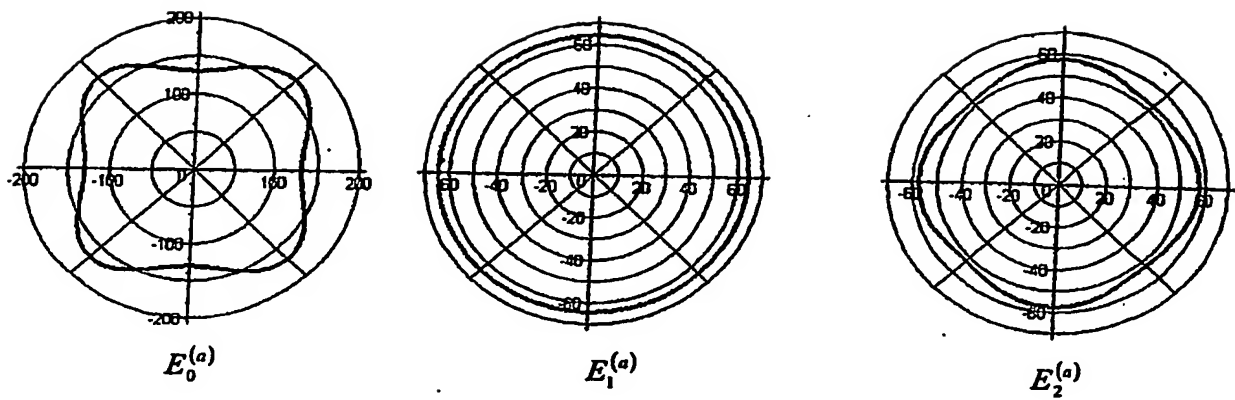


Figure 3

1/2

EPO - Munich
33
25. Nov. 2002

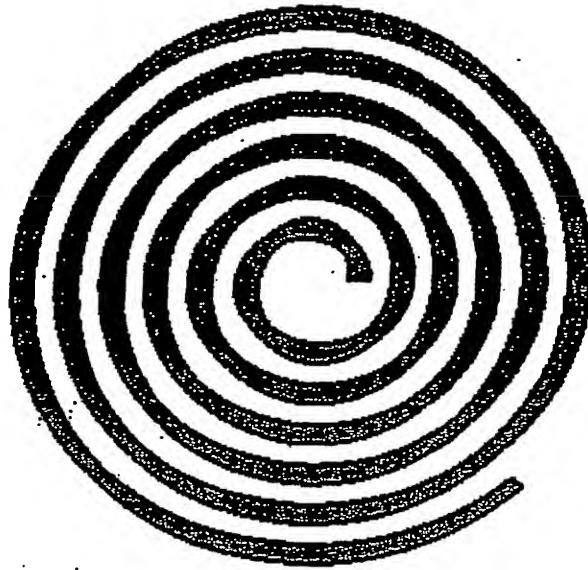


Figure 1

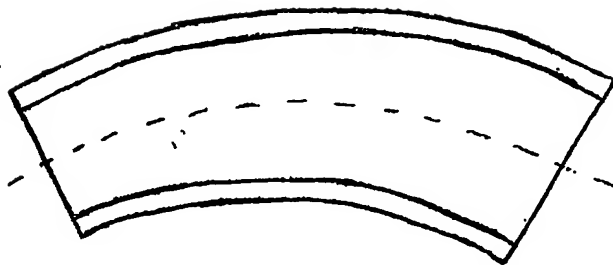


Figure 2a

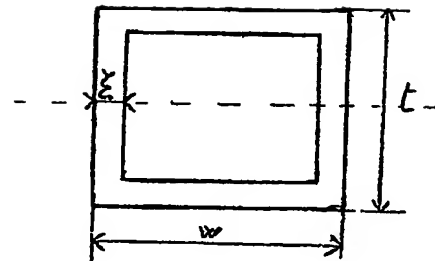


Figure 2b

BEST AVAILABLE COPY

PCT Application

CH0300709

